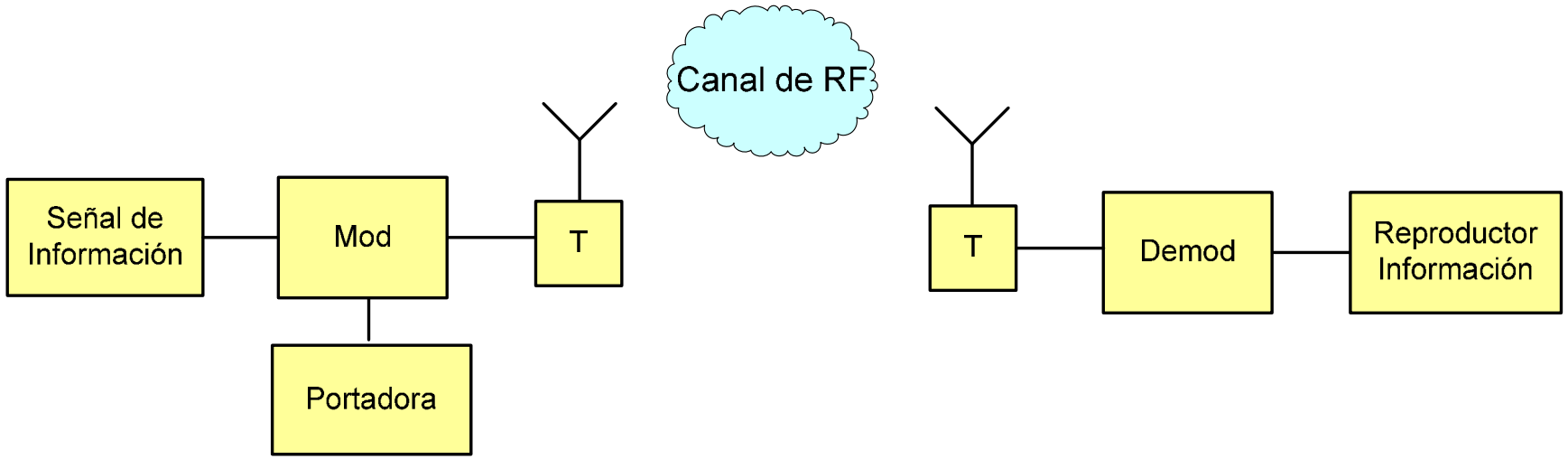
TEMA 4

- Modulación en amplitud: Conceptos y definiciones en general.
- Modulación en doble banda lateral y banda lateral única.
- Generación de señales moduladas en amplitud.
- Aplicaciones de los distintos tipos de modulación en AM.

Modulación

Comunicación implica la transmisión de información desde un punto hasta otro punto.



Por que es necesario modular para transmitir?

- Para disminuir las dimensiones de las antena
- optimizar el ancho de banda de cada canal evitando interferencia entre canales
- proteger la información de la degradacion por ruido y definir la calidad de la información transmitida

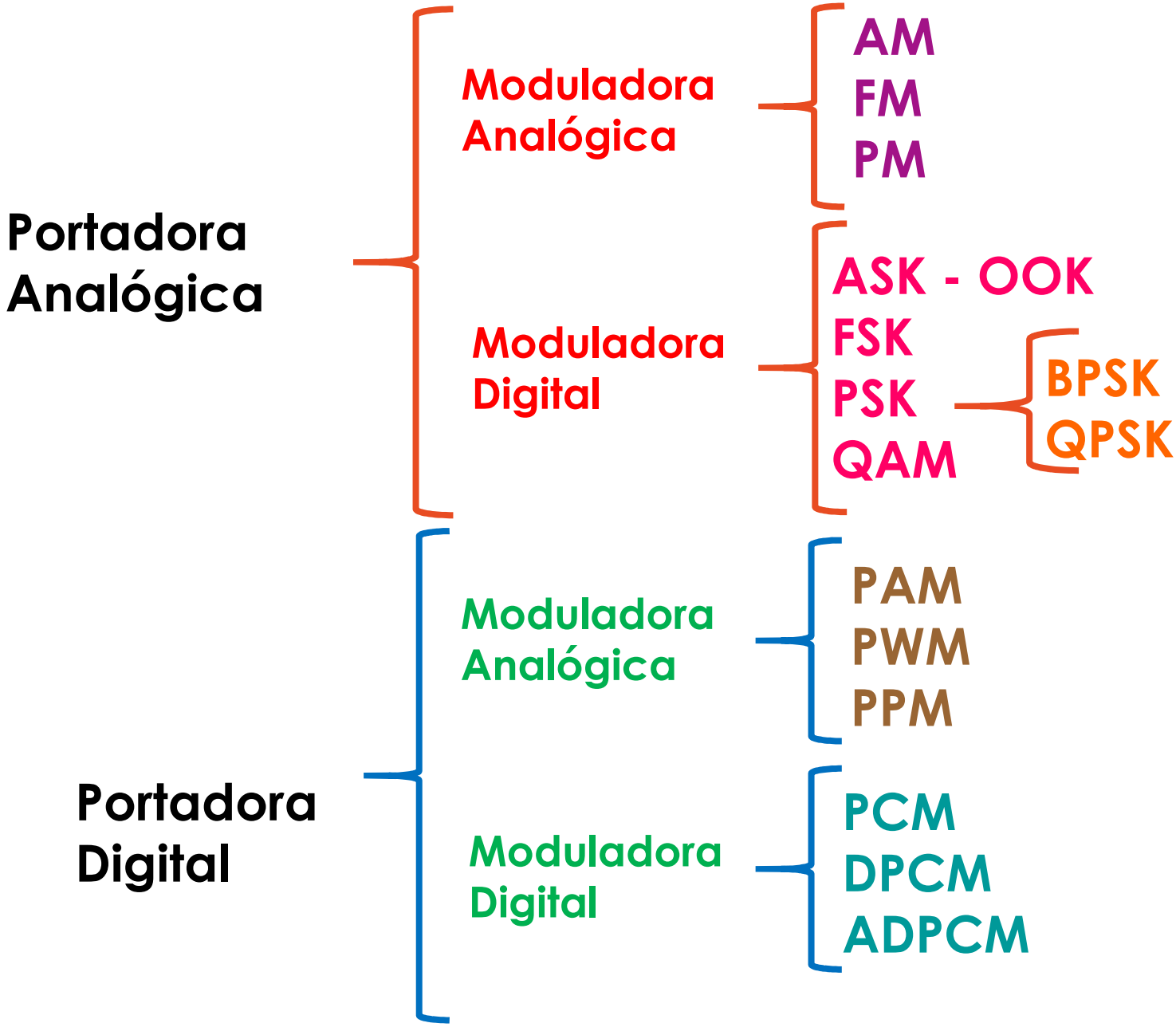
Modulación

- Se denomina **modulación** al proceso de colocar la información contenida en una señal, generalmente de baja frecuencia, sobre una señal de alta frecuencia.
- La modulación de una señal consiste en cambiar o alterar algunos parámetros de dicha señal. Esta señal llamada portadora, por ser a la vez conductora de señales más débiles como el sonido y el video

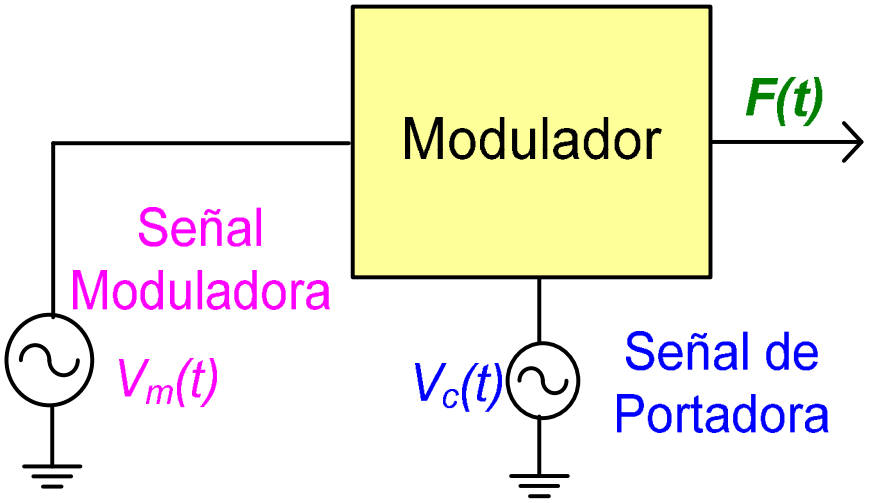
Debido a este proceso la señal de alta frecuencia, denominada portadora, sufrirá la modificación de alguna de sus parámetros, siendo dicha modificación proporcional a la amplitud de la señal de baja frecuencia denominada moduladora.

Muy importante!!

Tipos de Modulaciones



Modulación



$$F(t) = A(t)\cos[\omega_c t + \theta(t)]$$

$$F(t) = A(t)\cos\phi(t)$$

Toda onda senoidal tiene 2 parámetros principales:

Amplitud y Angulo.

Si:

$$A(t) \propto v_m(t) \quad y \quad \phi(t) = \text{constante}$$

⇨ **AM**

$$\phi(t) \propto v_m(t) \quad y \quad A(t) = \text{constante}$$

⇨ **FM- PM**

Modulación

- Se denomina **modulación** al proceso de colocar la información contenida en una señal (Moduladora), generalmente de baja frecuencia, sobre una señal de alta frecuencia (Portadora).

La modulación de una señal consiste en cambiar o variar sistemáticamente algún parámetro de la señal de alta frecuencia (portadora) en forma directamente proporcional a la señal de información (moduladora).

Se puede observar que si la portadora mantiene *A(t)*, $\omega(t)$ y $\phi(t)$ constantes en el tiempo obviamente no existe posibilidad alguna de transmitir información.

Muy importante!!

MODULACION EN AMPLITUD

$$A(t) \propto v_m(t) \quad y \quad \phi(t) = \text{constante}$$ ⇒ **AM**

Portadora → $v_C(t) = A_c(t)\cos[\omega_c t + \theta(t)]$

Moduladora → $v_m(t) = V_m \cos \omega_m t$

$A_c(t) = V_m \cos \omega_m t + V_c$ Variación del valor de pico de la amplitud de portadora

$v_{AM}(t) = (V_c + V_m \cos \omega_m t)\cos \omega_c t$ **Señal modulada en Amplitud**

Se debe cumplir: $\omega_m \ll \omega_c$ Mínimo 100 veces

$$v_{AM}(t) = V_c\left(1 + \frac{V_m}{V_c}\cos \omega_m t\right)\cos \omega_c t$$

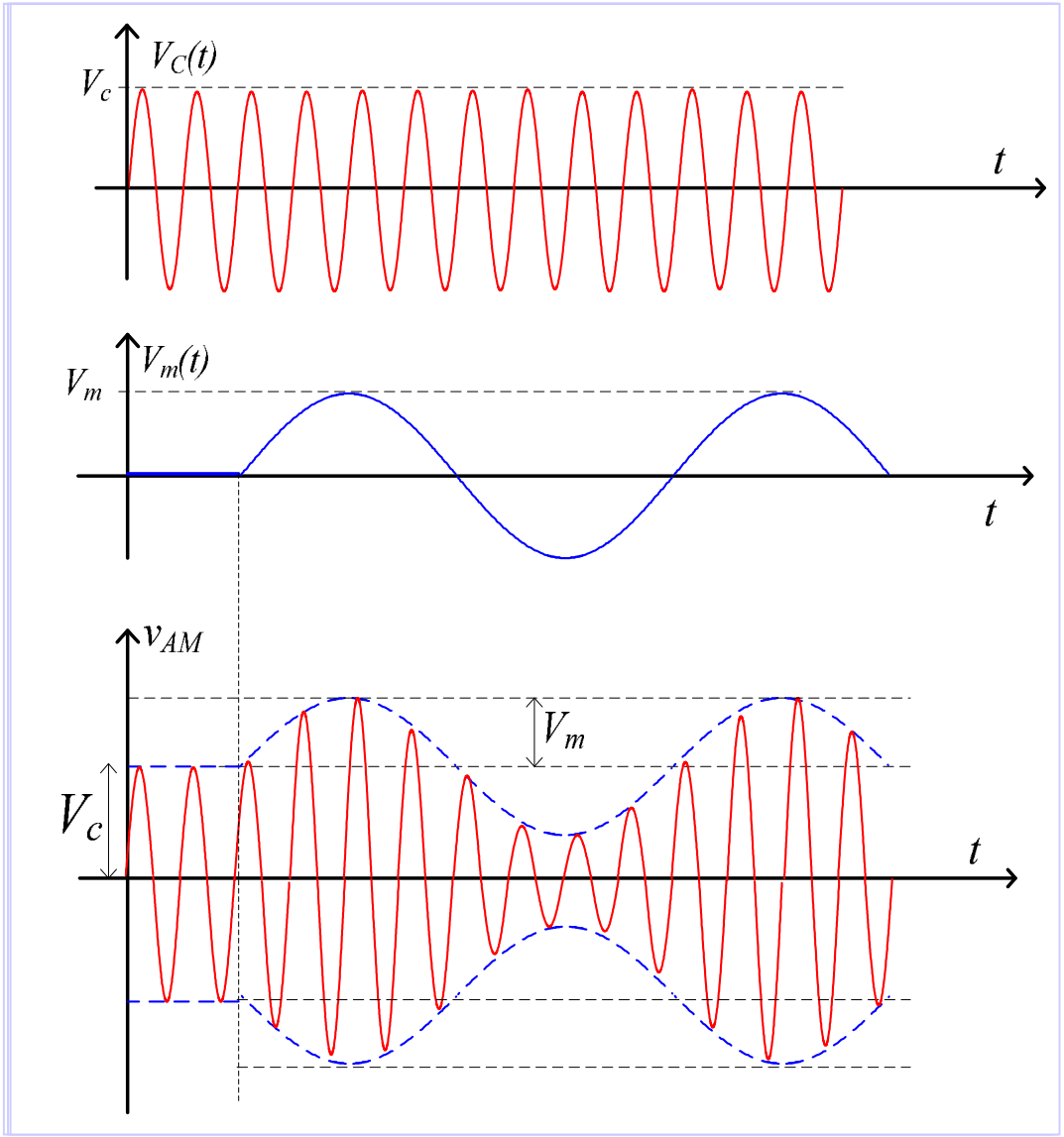
$m_a = \frac{V_m}{V_c}$ **Índice de modulación en amplitud**

Modulación en Amplitud

$$v_{AM}(t) = V_c\left(1 + m_a \cos\omega_m t\right)\cos\omega_c t$$

Señal modulada en Amplitud

$$m_a = \frac{V_m}{V_c}$$



Portadora

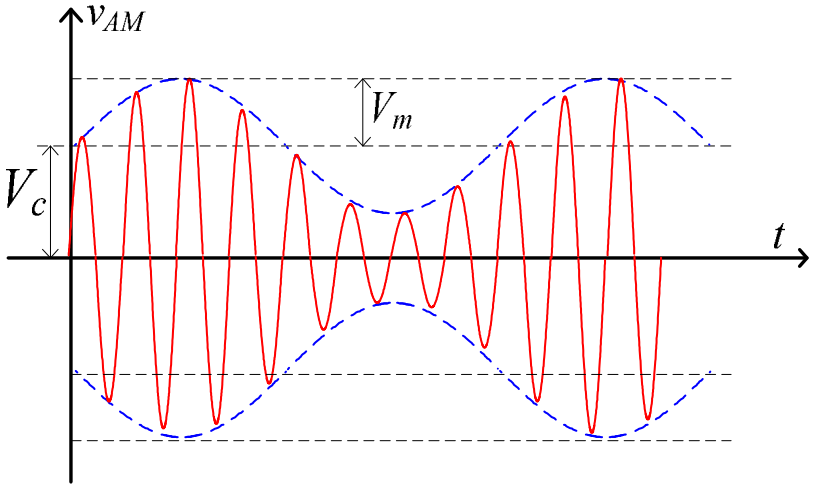
Moduladora

Señal modulada en Amplitud

Modulación en Amplitud

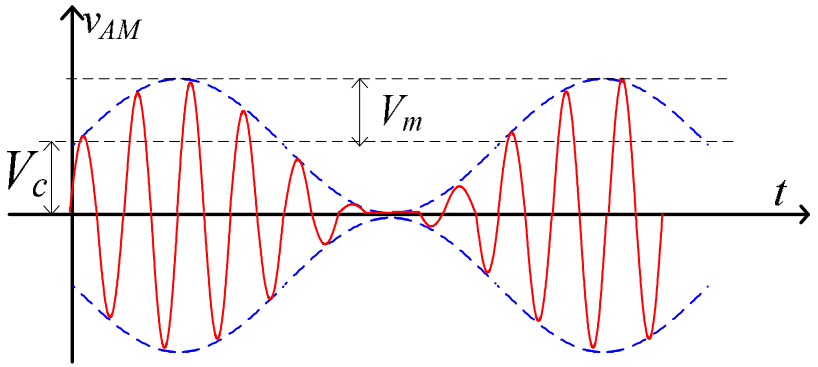
$$v_{AM}(t) = V_c\left(1 + m_a \cos\omega_m t\right)\cos\omega_c t$$

Señal modulada en Amplitud



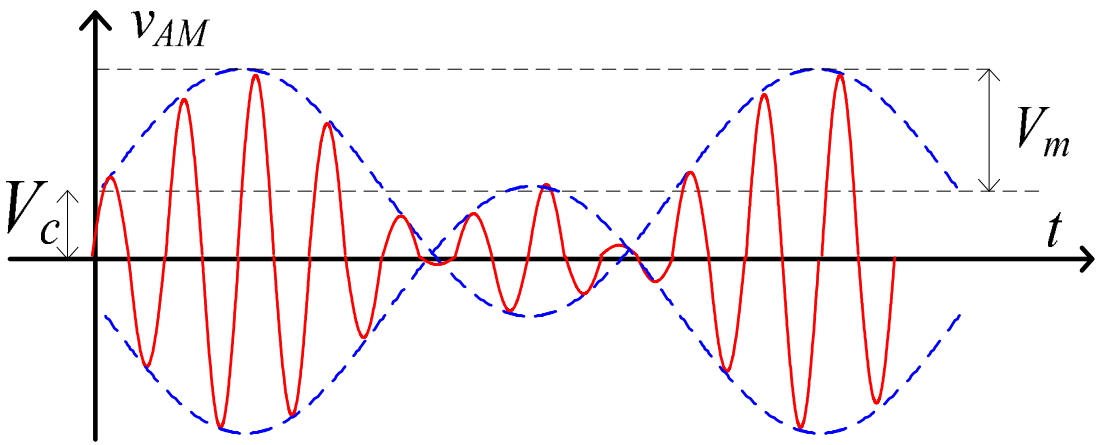
$$m_a = \frac{V_m}{V_c}$$

$$V_m < V_c \Rightarrow m_a < 1$$



$$V_m = V_c \Rightarrow m_a = 1$$

Modulación en Amplitud



$$V_m > V_c \Rightarrow m_a > 1$$

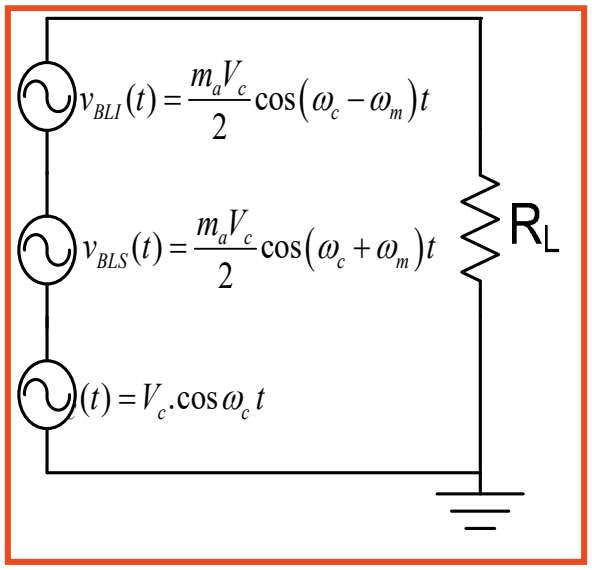
Sobremodulación

Para que no exista distorsión en la señal modulada en amplitud, se debe cumplir que $V_m \leq V_c$

Muy importante!!

$$0 \leq m_a \leq 1$$

La señal modulada en amplitud, puede ser simulada:



Señales de AM: Espectro

Si se aplica propiedad distributiva a la expresión de $v_{AM}(t)$:

$$v_{AM}(t) = V_c\left(1 + m_a \cos\omega_m t\right)\cos\omega_c t$$

$$v_{AM}(t) = V_c.\cos\omega_c t + V_c.m_a.\cos\omega_m t.\cos\omega_c t$$

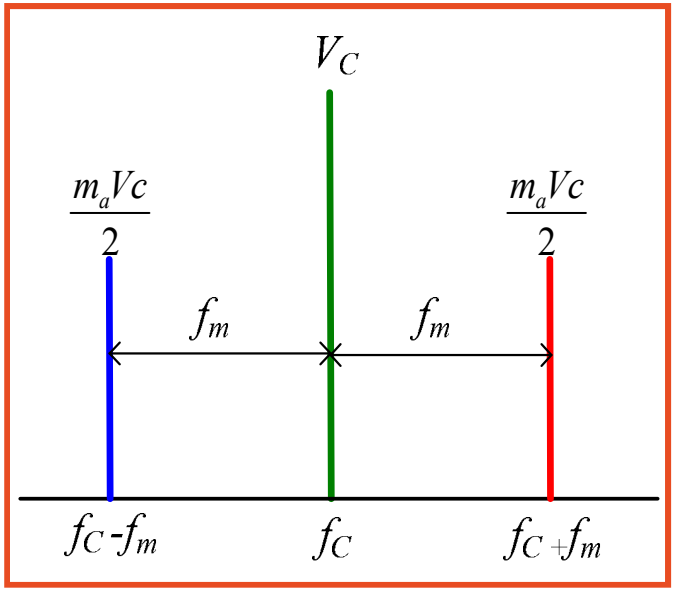
$$v_{AM}(t) = V_c.\cos\omega_c t + \frac{m_a V_c}{2}\cos\left(\omega_c + \omega_m\right)t + \frac{m_a V_c}{2}\cos\left(\omega_c - \omega_m\right)t$$

Portadora

Banda lateral superior

Banda lateral inferior

Espectro de la señal de AM



$$V_{BLS} = \frac{m_a V_c}{2}$$

$$V_{BLI} = \frac{m_a V_c}{2}$$

Son iguales

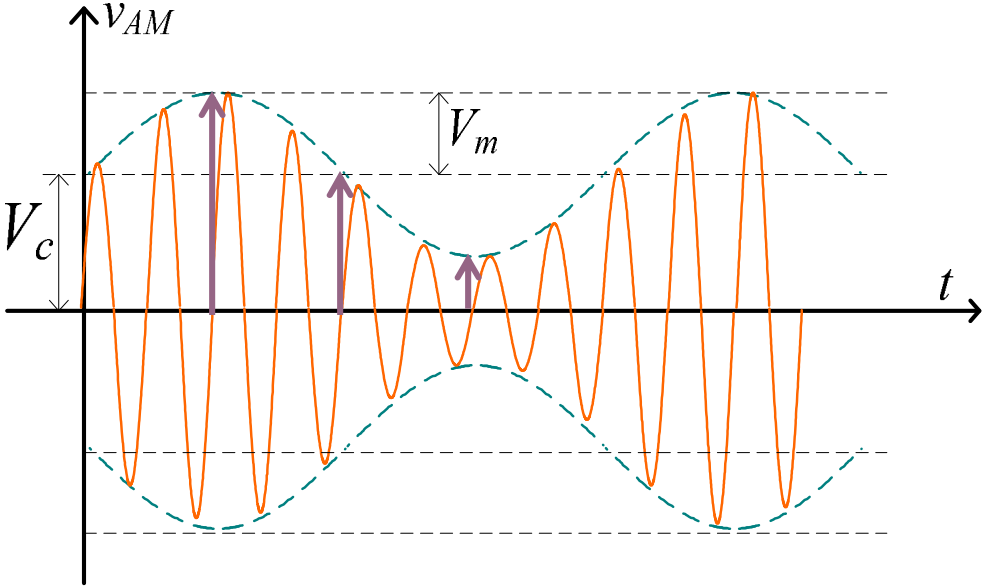
Ancho de banda de la señal de AM

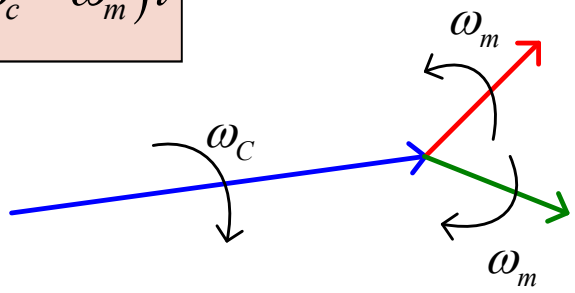
$$AB_{AM} = f_{BLS} - f_{BLI} = 2f_m$$

Muy importante!!

Señales de AM- Representación fasorial

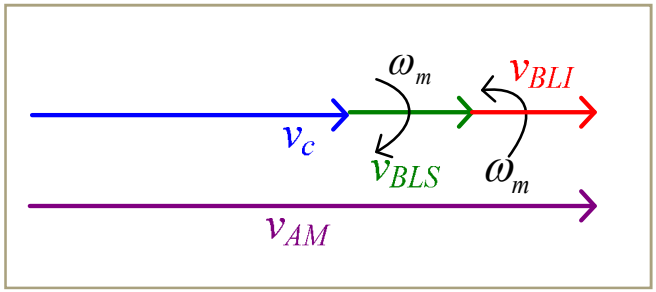
$$v_{AM}(t) = V_c.\cos\omega_c t + \frac{m_a V_c}{2}\cos(\omega_c + \omega_m)t + \frac{m_a V_c}{2}\cos(\omega_c - \omega_m)t$$

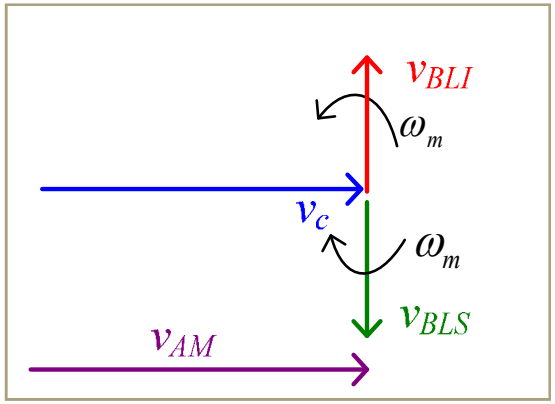


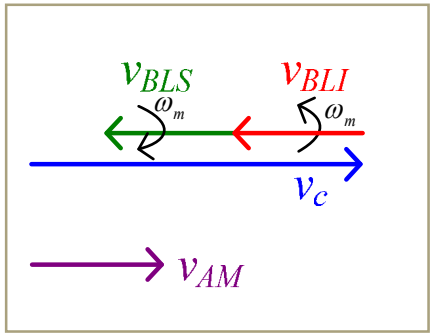


El fasor resultante de la suma de los fasores v_{BLS}+v_{BLI} tiene la misma dirección que el fasor portadora v_C

Muy importante!!

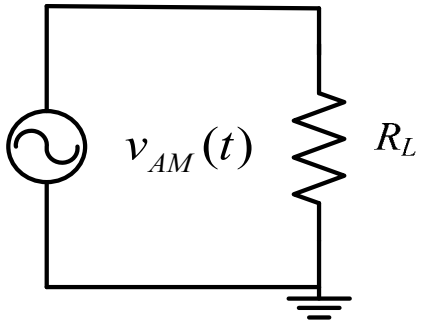






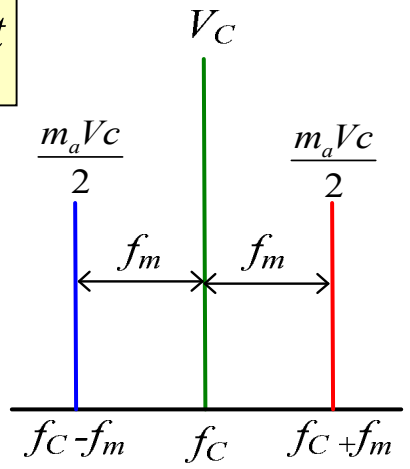
Señales de AM- Potencia

$$v_{AM}(t) = V_c.\cos\omega_c t + \frac{m_a V_c}{2}\cos(\omega_c + \omega_m)t + \frac{m_a V_c}{2}\cos(\omega_c - \omega_m)t$$



$$P_{Cm} = \frac{1}{R_L}\int v_{Cm}(t)^2 dt$$

$$P_{Cm} = P_c + P_{BLS} + P_{BLI}$$



$$P_{Cm} = \frac{V_c^2}{2R_L} + \left(\frac{m_a V_c}{2}\right)^2 \frac{1}{2R_L} + \left(\frac{m_a V_c}{2}\right)^2 \frac{1}{2R_L} = \frac{V_c^2}{2R_L}\left(1 + \frac{m_a^2}{2}\right)$$

$$P_{Cm} = P_c\left(1 + \frac{m_a^2}{2}\right)$$

$$m_a = 0 \Rightarrow P_{Cm\,mín} = P_c$$

Muy importante!!

$$m_a = 1 \Rightarrow P_{Cm\,máx} = 1{,}5P_c$$

Señales de AM- Potencia

Eficiencia de modulación: relación entre la potencia útil de señal y la potencia total de la señal modulada:

$$\eta = \frac{P_{BL}}{P_{Cm}} = \frac{m_a^{\,2}}{4\left(1+\frac{m_a^{\,2}}{2}\right)}$$

El concepto de *eficiencia de modulación*, no debe confundirse con el de la *eficiencia del transmisor*. Este se relaciona con otros factores como rendimiento de los amplificadores de potencia

$$\eta\big|_{m_a=1} = \frac{1}{4\left(1+\frac{1}{2}\right)} = \frac{1}{6} = 16,6\%$$

Otra forma importante de evaluar la potencia de un transmisor de AM es medir o calcular la potencia **"PEP"** (*peak envelope power*) que se define como la máxima potencia media para un ciclo de RF y se expresa como.

$$P_{PEP} = \frac{V_{CM\max}^{\;2}}{2R_L}$$

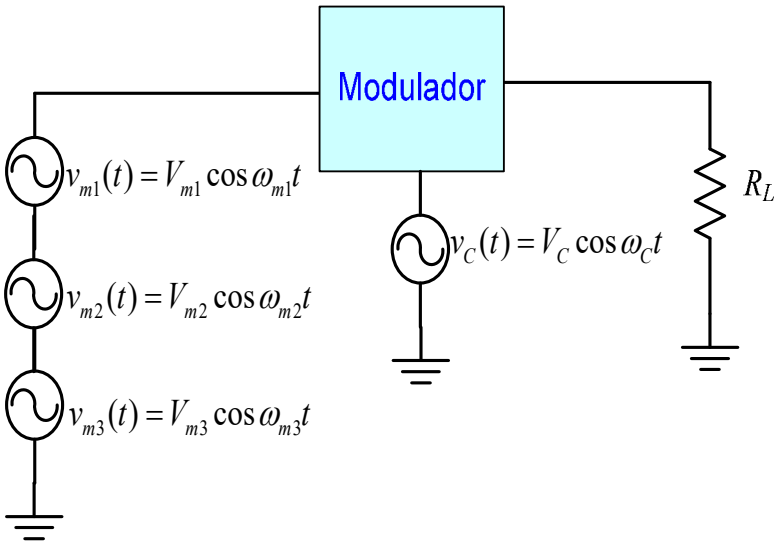
Para una señal modulada por un tono simple:

$$P_{PEP} = \frac{\left(V_C + V_m\right)^2}{2R_L} = P_C\left(1+m_a\right)^2$$

Señales de AM- Moduladora compuesta

Sea una moduladora compuesta por tres tonos::

$$v_m(t) = V_{m1}.\cos\omega_{m1}t + V_{m2}.\cos\omega_{m2}t + V_{m3}.\cos\omega_{m3}t$$



Se puede demostrar, que cada tono genera un par de bandas laterales (S+I),ubicadas a $f_{m\,n}$ de la portadora

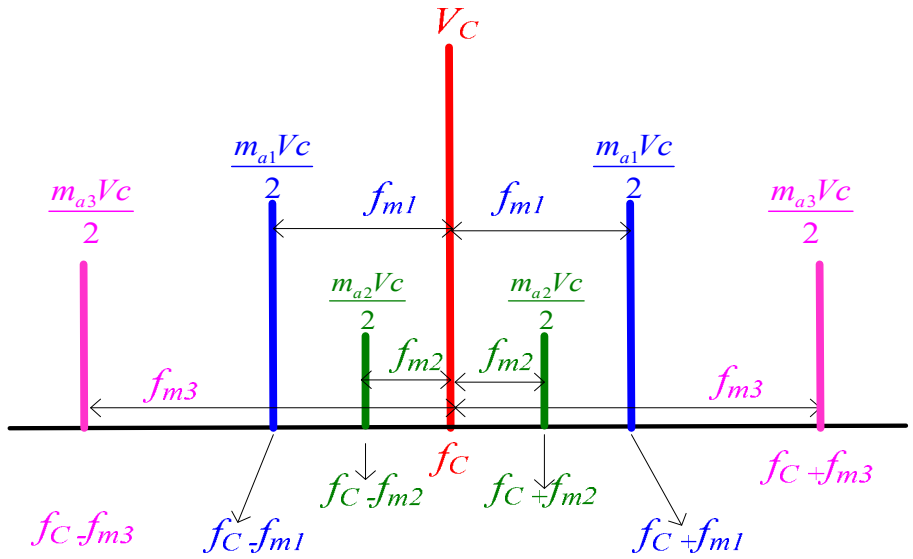
Muy importante!!

$$v_{AM}(t) = V_c.\cos\omega_c t + \frac{m_{a1}V_c}{2}\cos(\omega_c+\omega_{m1})t + \frac{m_{a1}V_c}{2}\cos(\omega_c-\omega_{m1})t$$

$$+\frac{m_{a2}V_c}{2}\cos(\omega_c+\omega_{m2})t + \frac{m_{a2}V_c}{2}\cos(\omega_c-\omega_{m2})t +$$

$$+\frac{m_{a3}V_c}{2}\cos(\omega_c+\omega_{m3})t + \frac{m_{a3}V_c}{2}\cos(\omega_c-\omega_{m3})t +$$

Señales de AM- Moduladora compuesta



$$AB_{AM} = 2f_{m\ máx}$$

Se define como índice de modulación eficaz a:

$$m_{a\ eff} = \sqrt{m_{a1}{}^2 + m_{a2}{}^2 + ... + m_{an}{}^2}$$

la condición de que $m_{a\ eff}<1$, no implica que la señal esté sobremodulada

La potencia desarrollada es:

$$P_{Cm} = P_c\left(1 + \frac{m_{a\,eff}{}^2}{2}\right)$$

Muy importante!!

Señales de AM- Conclusiones

Ventajas:

a) Son fáciles de generar

b) Los receptores de AM son muy sencillos y económicos.

Desventajas:

a) La potencia utilizada en la portadora no aporta información y la usada en las bandas laterales es redundante desde el punto de vista de la información que se transmite.

$$\eta = \frac{P_{BL}}{P_{Cm}} = \frac{m_a^{\,2}}{4\left(1+\frac{m_a^{\,2}}{2}\right)} \Rightarrow \eta_{máx} = \frac{1}{6} = 16{,}6\%$$

b) El ancho de banda está duplicado teniendo en cuenta que las dos bandas laterales tienen la misma información.

c) P_{CM} no es nula en ningún momento, incluso en ausencia de información (v_m =0).

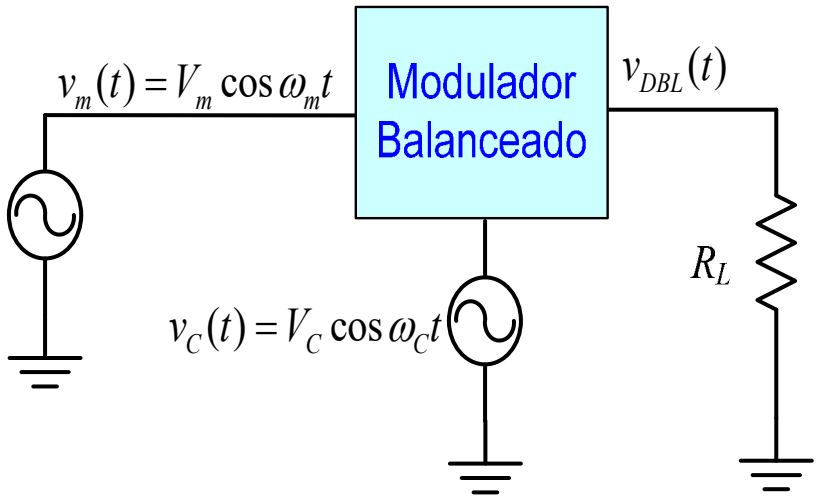
d) Mayor sensibilidad al ruido que en otras modulaciones

Muy importante!!

Señales de AM- Doble Banda Lateral

Las señales de AM sin portadora, se llaman de "doble banda lateral" o DBL.

Se obtienen a partir de una señal que modula a una portadora en un modulador balanceado



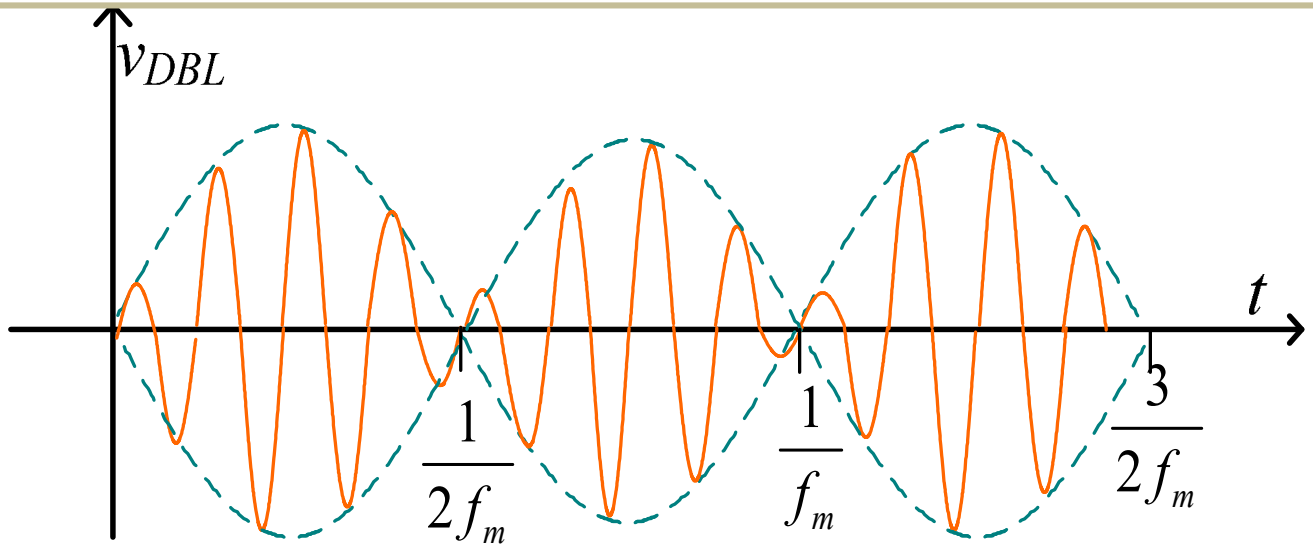
El modulador balanceado realiza el producto de las señales de entrada

$$v_{DBL}(t) = k.v_m(t).v_C(t) \longrightarrow v_{DBL}(t) = k.V_m \cos \omega_m t.V_c \cos \omega_c t$$

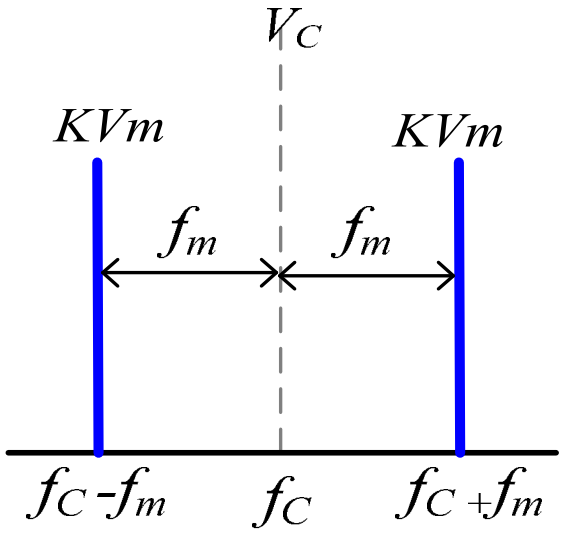
$$v_{DBL}(t) = k.V_m .V_c.\cos(\omega_c + \omega_m)t + k.V_m .V_c.\cos(\omega_c - \omega_m)t$$

$$v_{DBL}(t) = K.V_m \cos(\omega_c + \omega_m)t + K.V_m \cos(\omega_c - \omega_m)t$$

Señales de AM- Doble Banda Lateral



$$AB = 2f_{mmáx}$$



En una señal de DBL no se habla de índice de modulación.

El único límite que existe para modular, es el que otorgan los márgenes físicos de los componentes que integran el modulador y sus amplificadores

Conclusiones

Las señales moduladas en DBL tienen como principal ventaja el ahorro de energía que brinda la ausencia de la portadora.

Sus desventajas más notables son:

a) La potencia utilizada en una de las bandas laterales es redundante desde el punto de vista de la información que se transmite.

$$P_{DBL} = P_{BLS} + P_{BLI} = 2\frac{(kV_m)^2}{2R_L} = \frac{(kV_m)^2}{R_L}$$

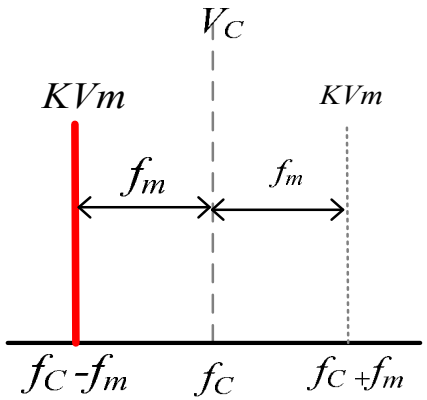
$$\eta = \frac{P_{BL}}{P_{Cm}} = \frac{1}{2}$$

b) El ancho de banda está duplicado ya que las dos bandas laterales contienen la misma información.

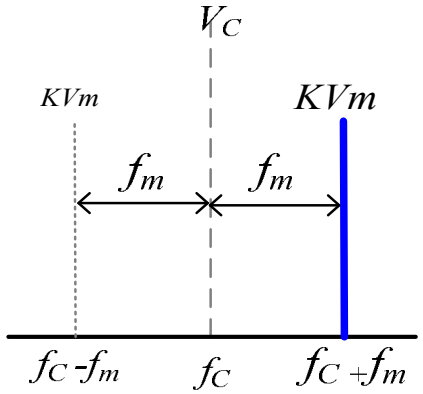
c) Sistema receptor mas complejo.

Señales de AM- Banda Lateral Unica -BLU

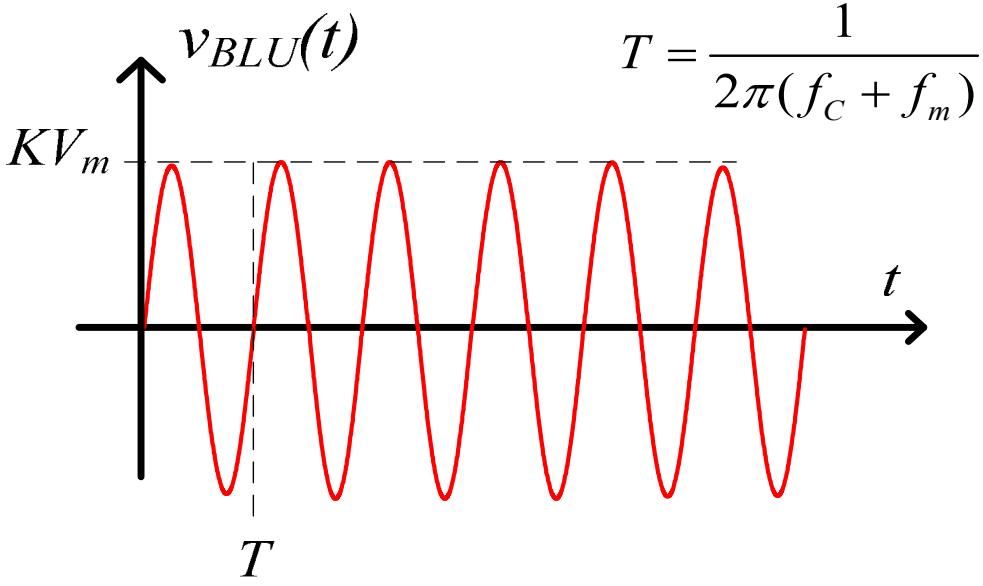
$$v_{BLS}(t) = K.V_m \cos(\omega_m + \omega_c)t$$



$$AB = f_{mmáx}$$



$$v_{BLI}(t) = K.V_m \cos(\omega_c - \omega_m)t$$



$$T = \frac{1}{2\pi(f_C + f_m)}$$

$$P_{BL} = \frac{(KV_m)^2}{2R_L}$$

$$\eta = \frac{P_{BL}}{P_{Cm}} = 1$$

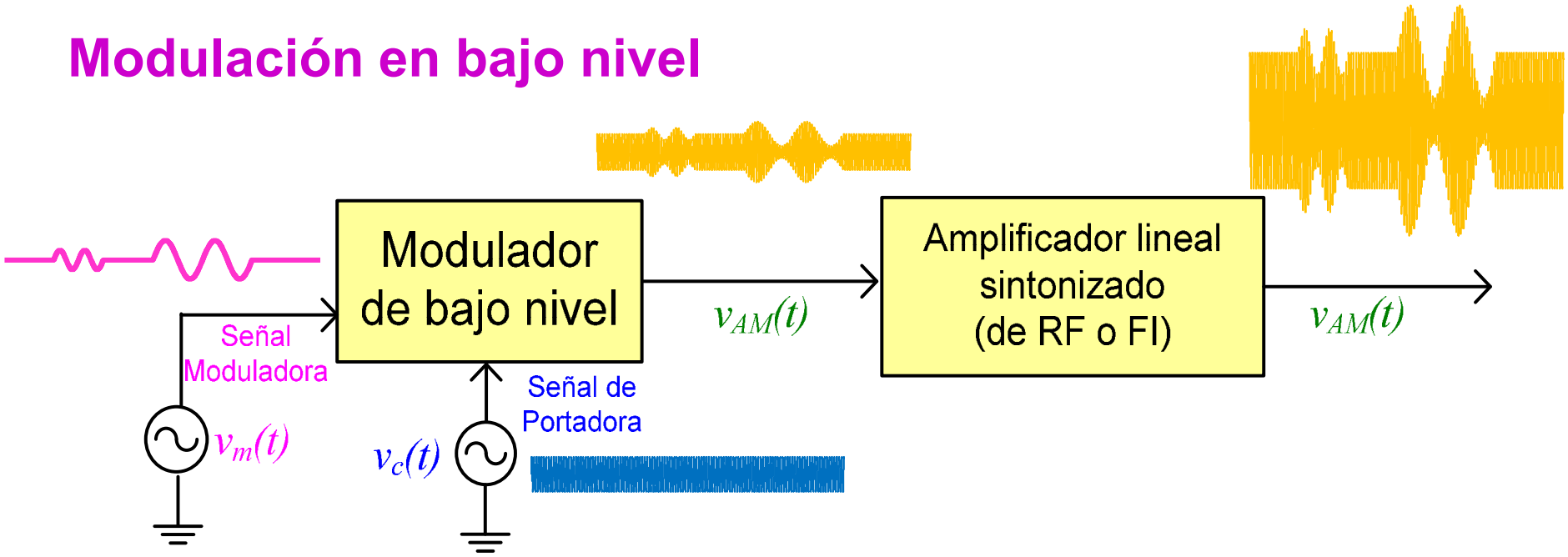
Generación de Señales de AM

Para modular una portadora en amplitud. Hay dos opciones:

1- Modulación en bajo nivel

2- Modulación en alto nivel

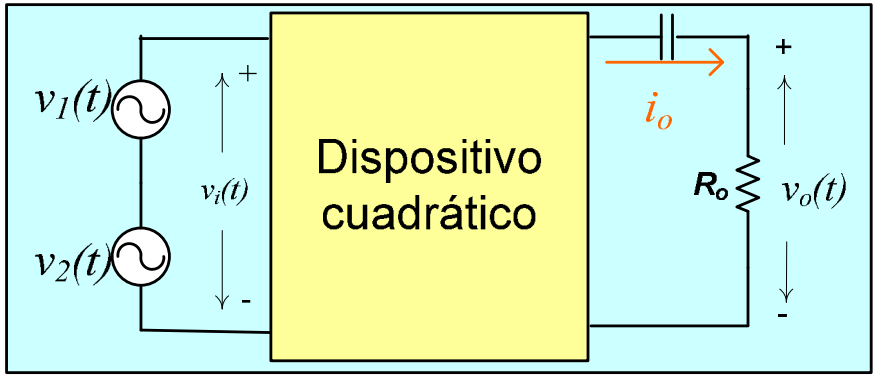
Modulación en bajo nivel



- **El amplificador de RF es sintonizado con $f_O = f_c$ o f_O=FI y AB= 2 $f_{m\ max}$. Lineal: clase A o B, de pequeña señal y bajo rendimiento.**

Moduladores de AM de bajo nivel

$$v_i(t) = V_1 \cos \omega_1 t + V_2 \cos \omega_2 t$$



La corriente de salida io es:

$$i_O(t) = I_o + a\,v_i(t) + b\,v_i^2(t) + c\,v_i^3(t)$$

Reemplazando:

$$i_O(t) = aV_1 \cos \omega_1 t + aV_2 \cos \omega_2 t + bV_1^2 \cos^2 \omega_1 t + bV_2^2 \cos^2 \omega_2 t + 2bV_1V_2 \cos \omega_1 t \cos \omega_2$$

$$bV_1^2 \cos^2 \omega_1 t = \frac{b}{2} V_1^2 (1 + \cos 2\omega_1 t)$$

$$bV_2^2 \cos^2 \omega_2 t = \frac{b}{2} V_2^2 (1 + \cos 2\omega_2 t)$$

$$2bV_1V_2 \cos \omega_1 t \cos \omega_2 = bV_1V_2[\cos(\omega_1 + \omega_2) + \cos(\omega_1 - \omega_2)]$$

Amplitud	Frecuencia
aV_1	f_1
aV_2	f_2
$½\ bV_1^2$	$2f_1$
$½\ bV_2^2$	$2f_2$
bV_1V_2	$f_1 + f_2$
bV_1V_2	$f_1 - f_2$

Moduladores de AM de bajo nivel

Si: $v_1(t) = v_C(t) = V_C \cos \omega_C t$ $\quad$ $v_2(t) = v_m(t) = V_m \cos \omega_m t$

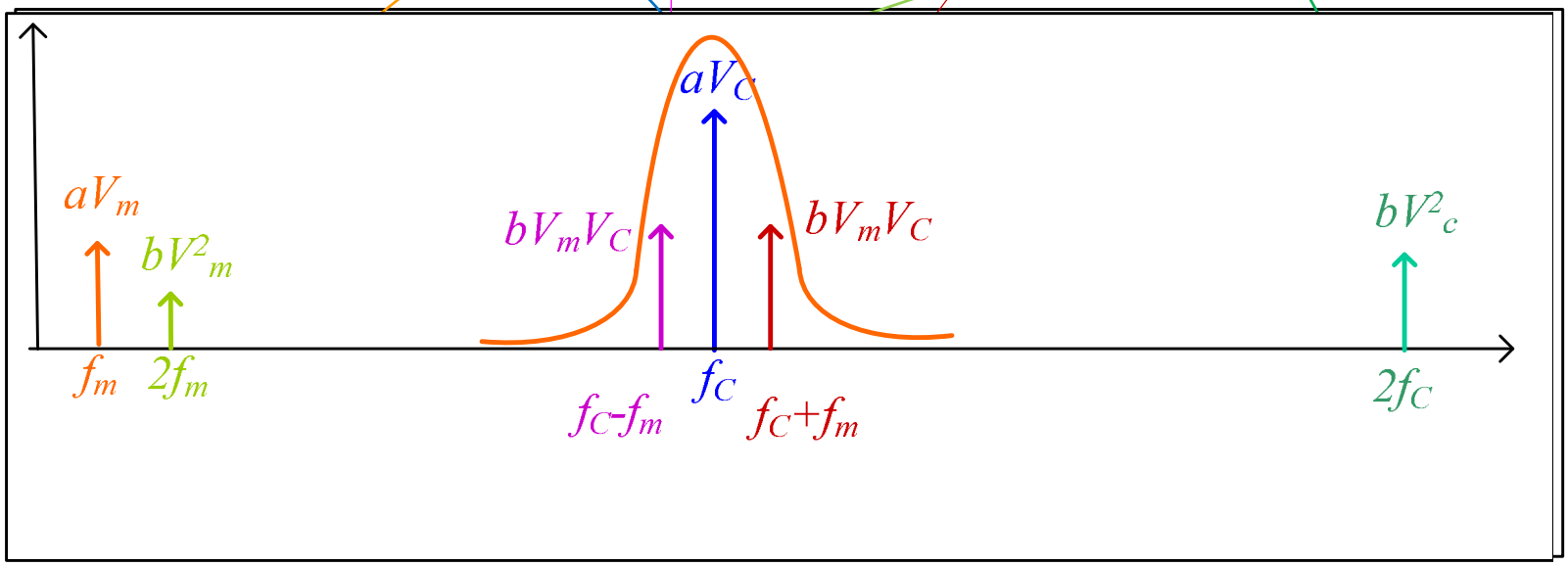
Entonces: $i_O(t) = aV_C \cos \omega_C t + aV_m \cos \omega_m t + bV_C^2 \cos^2 \omega_C t + bV_m^2 \cos^2 \omega_m t +$

$$+ bV_C V_m \cos(\omega_C + \omega_m)t + bV_C V_m \cos(\omega_C - \omega_m)t$$

$$i_O(t) = aV_C \cos \omega_C t + aV_m \cos \omega_m t + \frac{bV_C^2}{2} \cos 2\omega_C t + \frac{bV_m^2}{2} \cos 2\omega_m t +$$

$$+ bV_C V_m \cos(\omega_C + \omega_m)t + bV_C V_m \cos(\omega_C - \omega_m)t$$

Realizando el espectro:



Se filtra la señal con un filtro resonante a $f_0=f_c$ y $AB=2f_{mmáx}$

Moduladores de AM de bajo nivel

A la salida del filtro, se obtiene la señal:

$$v_{AM}(t) = aV_C \cos\omega_C t + bV_C V_m \cos(\omega_C + \omega_m)t + bV_C V_m \cos(\omega_C - \omega_m)t$$

Comparando con la señal de AM:

$$v_{AM}(t) = V_c.\cos\omega_c t + \frac{m_a V_c}{2}\cos(\omega_c + \omega_m)t + \frac{m_a V_c}{2}\cos(\omega_c - \omega_m)t$$

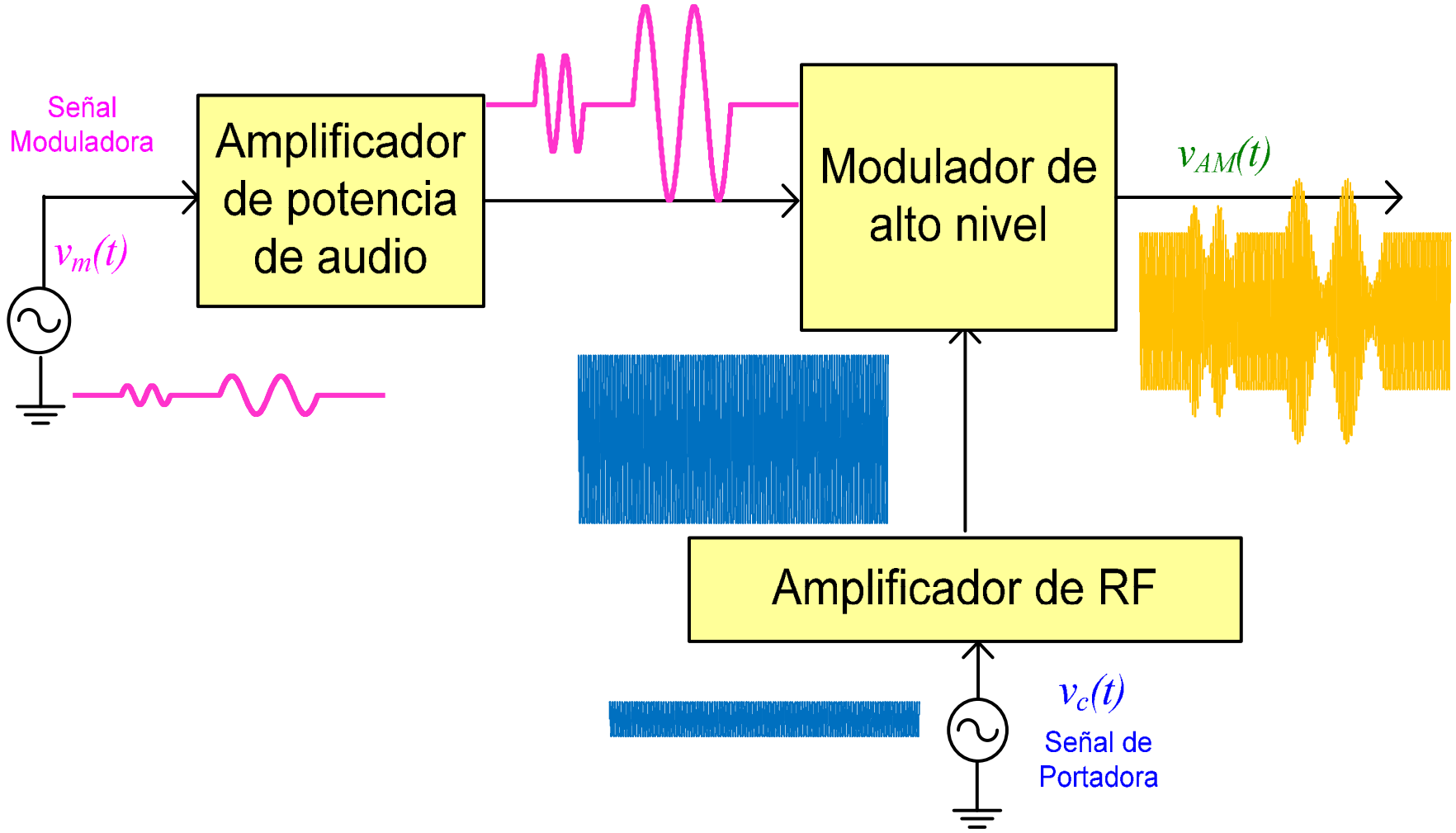
Portadora *Banda lateral superior* *Banda lateral inferior*

Se observa:

1. *El coeficiente "b"* debe ser lo mas grande posible. Este término en un dispositivo alineal depende del punto de trabajo del mismo. Normalmente puede ser mejorarado modificando la polarización del dispositivo, ya sea que se trate de un diodo o un transistor.
2. Haciendo V_m lo más grande posible.
3. Haciendo V_C lo mas grande posible. Esto significa tener un oscilador local con una muy buena señal de salida para excitar al modulador.

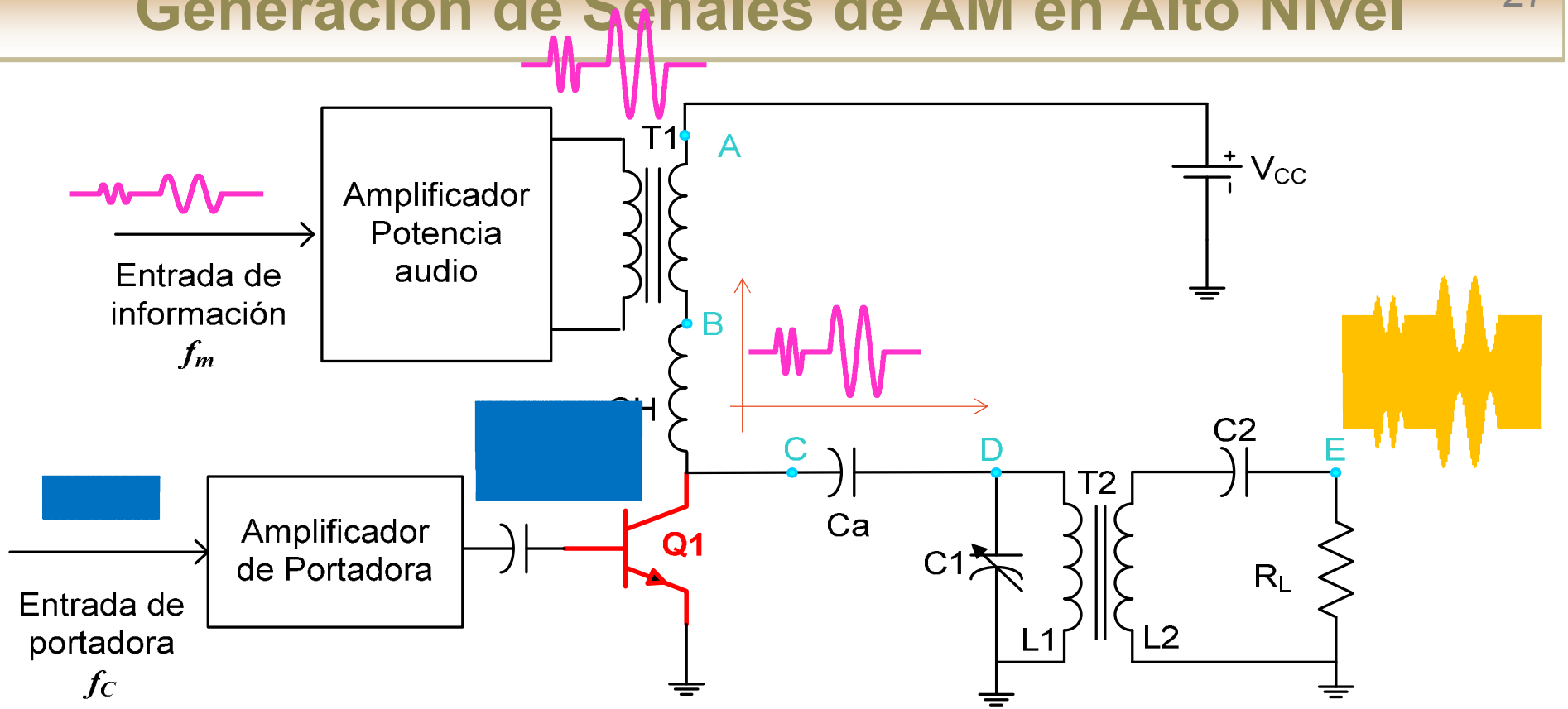
Generación de Señales de AM

Modulación en alto nivel de potencia



- El amplificador de RF no necesita ser lineal, trabaja con alto rendimiento
- El amplificador de Potencia de audio es lineal, generalmente clase B

Generación de Señales de AM en Alto Nivel

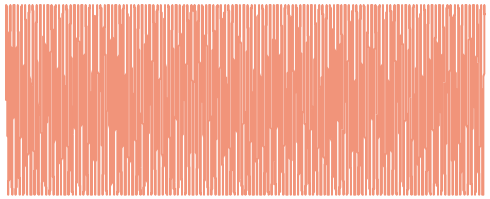


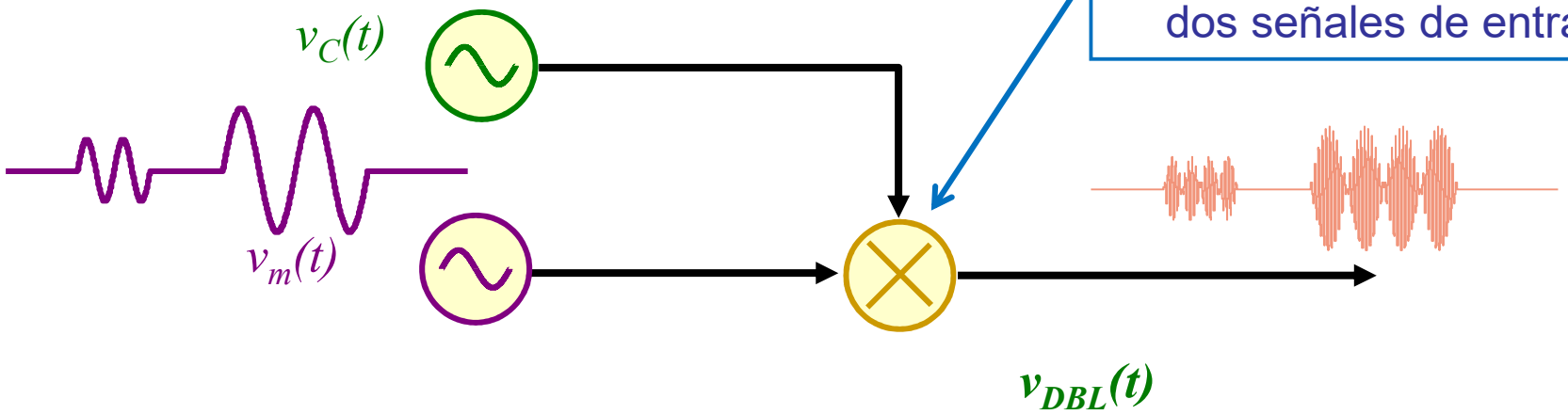
- El transistor Q1 recibe por base la señal de portadora generada por un oscilador y amplificada al nivel necesario para hacer trabajar a Q1 en clase C y proporcionar la potencia de salida necesaria.
- La señal en banda base se aplica mediante un transformador cuyo secundario se comporta como una fuente de tensión en serie con la tensión V_{CC} de continua, haciendo que el punto de funcionamiento del transistor varíe de acuerdo a la señal moduladora.

Modulador de Doble Banda Lateral

Señales de entrada:

$$\begin{cases} v_C(t) = V_C \cos \omega_C t \\ v_m(t) = V_m \cos \omega_m t \end{cases}$$





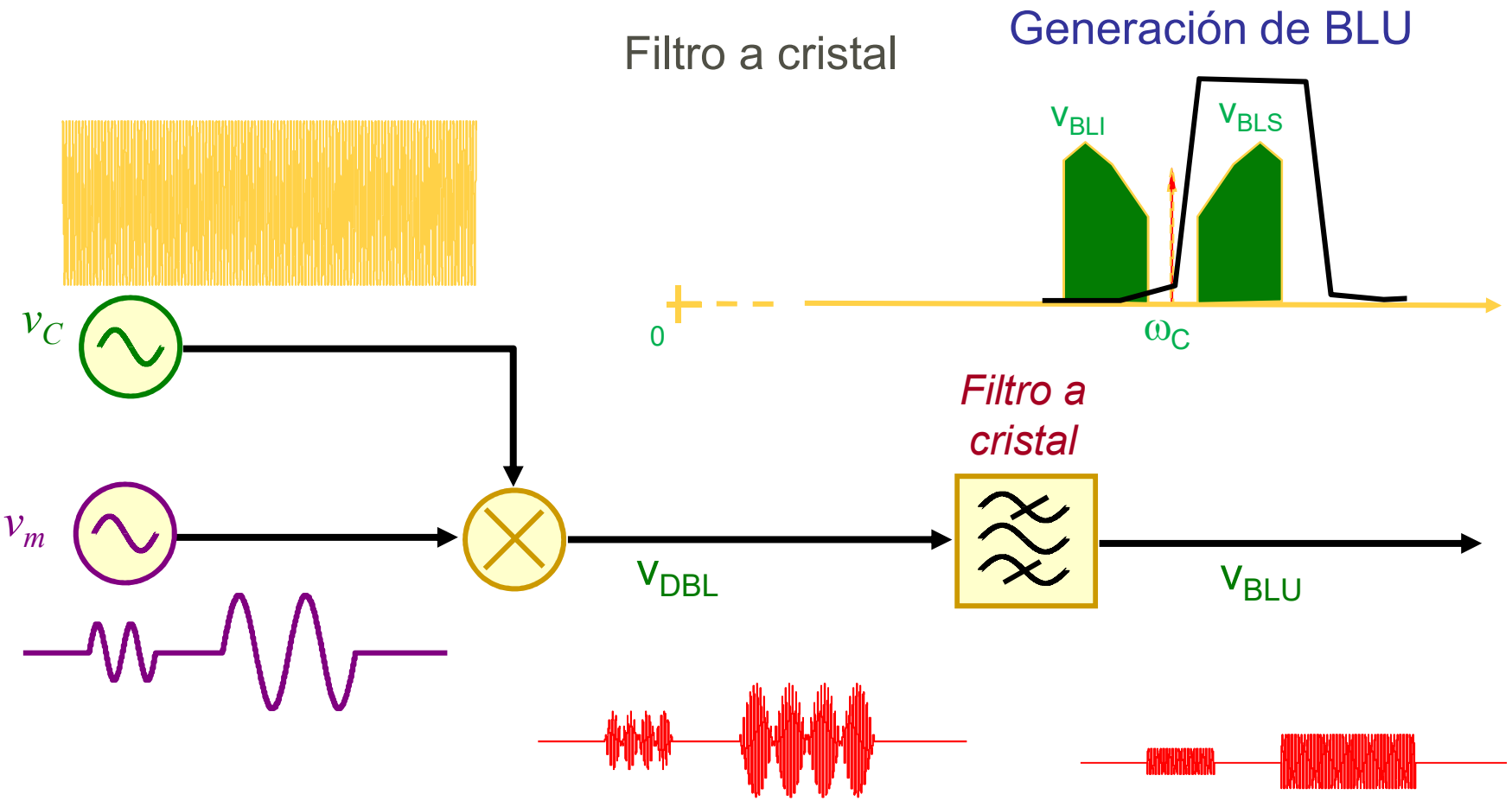
- Modulador balanceado
- Realiza el producto de las dos señales de entrada

$$v_{DBL}(t) = K.\left(V_C \cos \omega_C t\right).\left(V_m \cos \omega_m t\right)$$

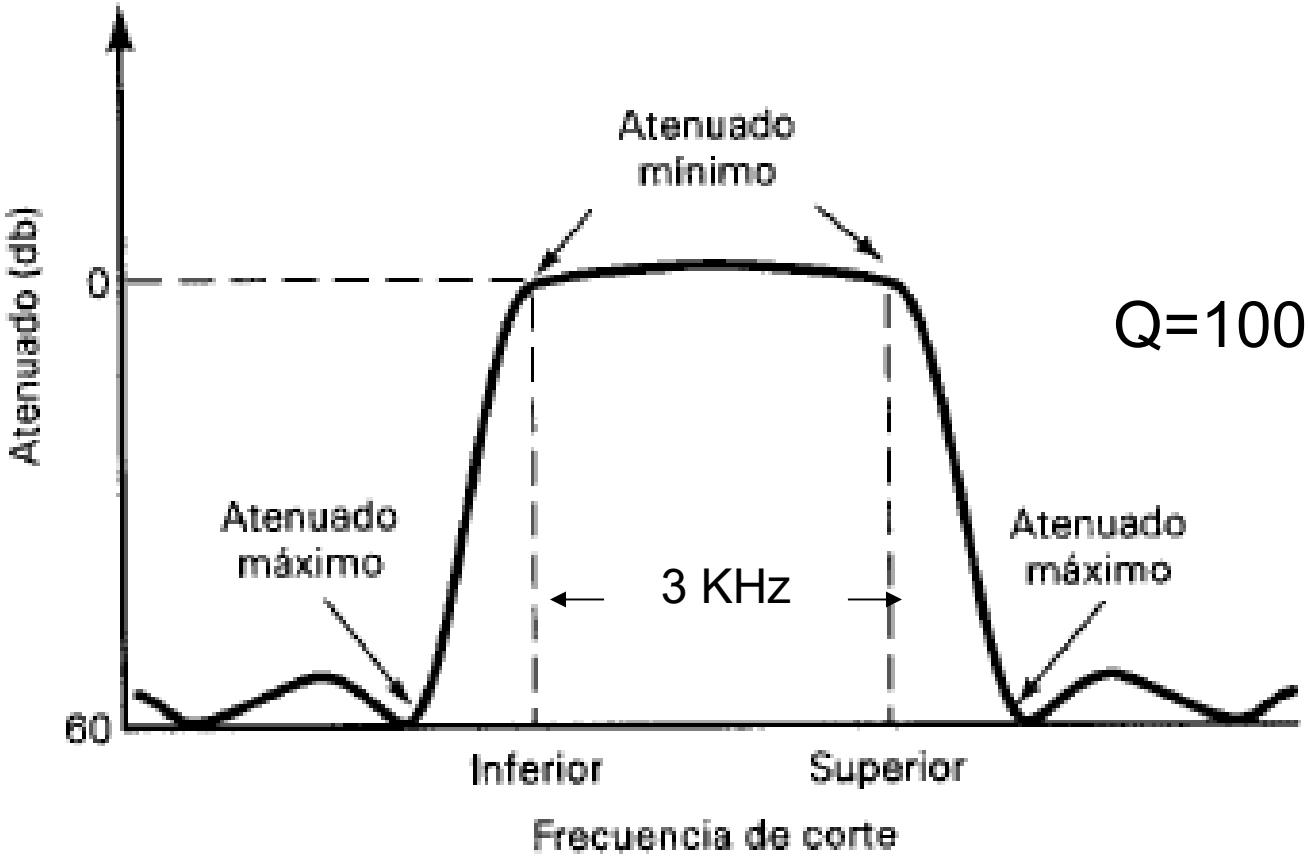
$$v_{DBL}(t) = KV_CV_m \cos\left(\omega_C + \omega_m\right)t + KV_CV_m \cos\left(\omega_C - \omega_m\right)t$$

Modulador de Banda Lateral Unica

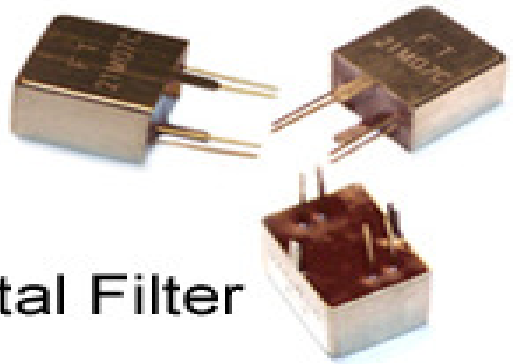
Modulación de BLU por filtrado de la banda lateral no deseada



FILTROS DE CRISTAL

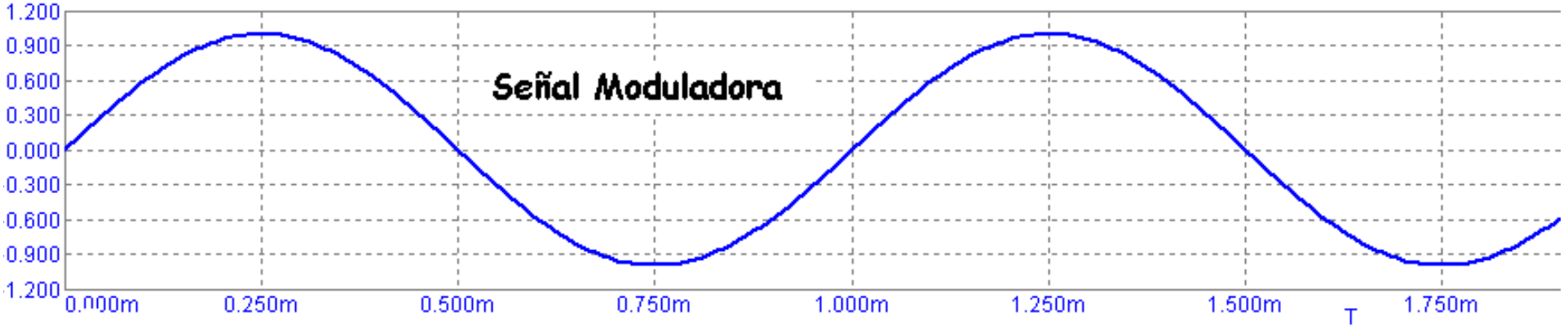


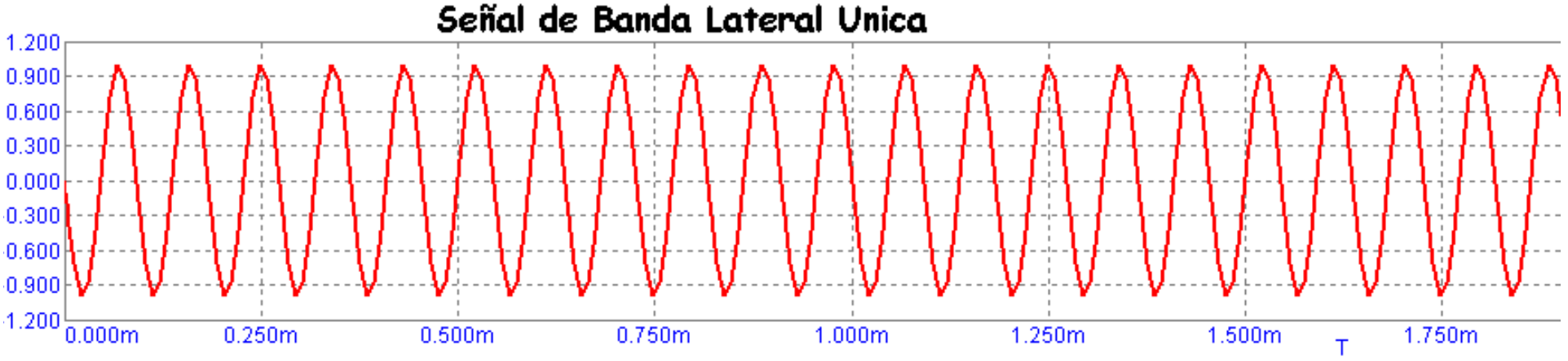
Q=100.000

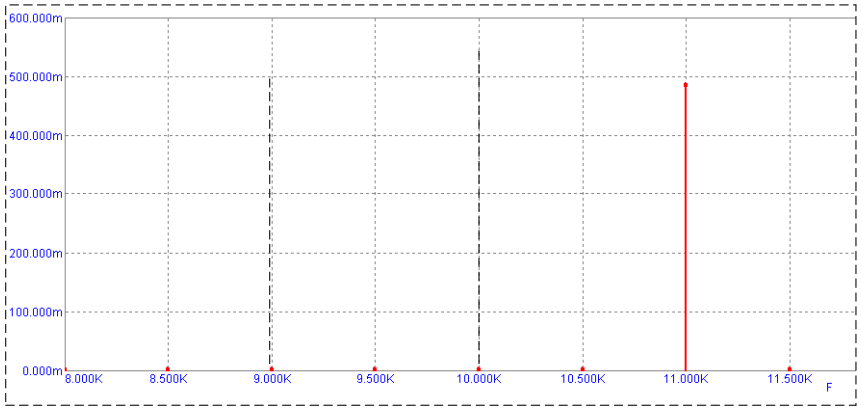


Crystal Filter

Señales de AM- Banda Lateral Única- BLU

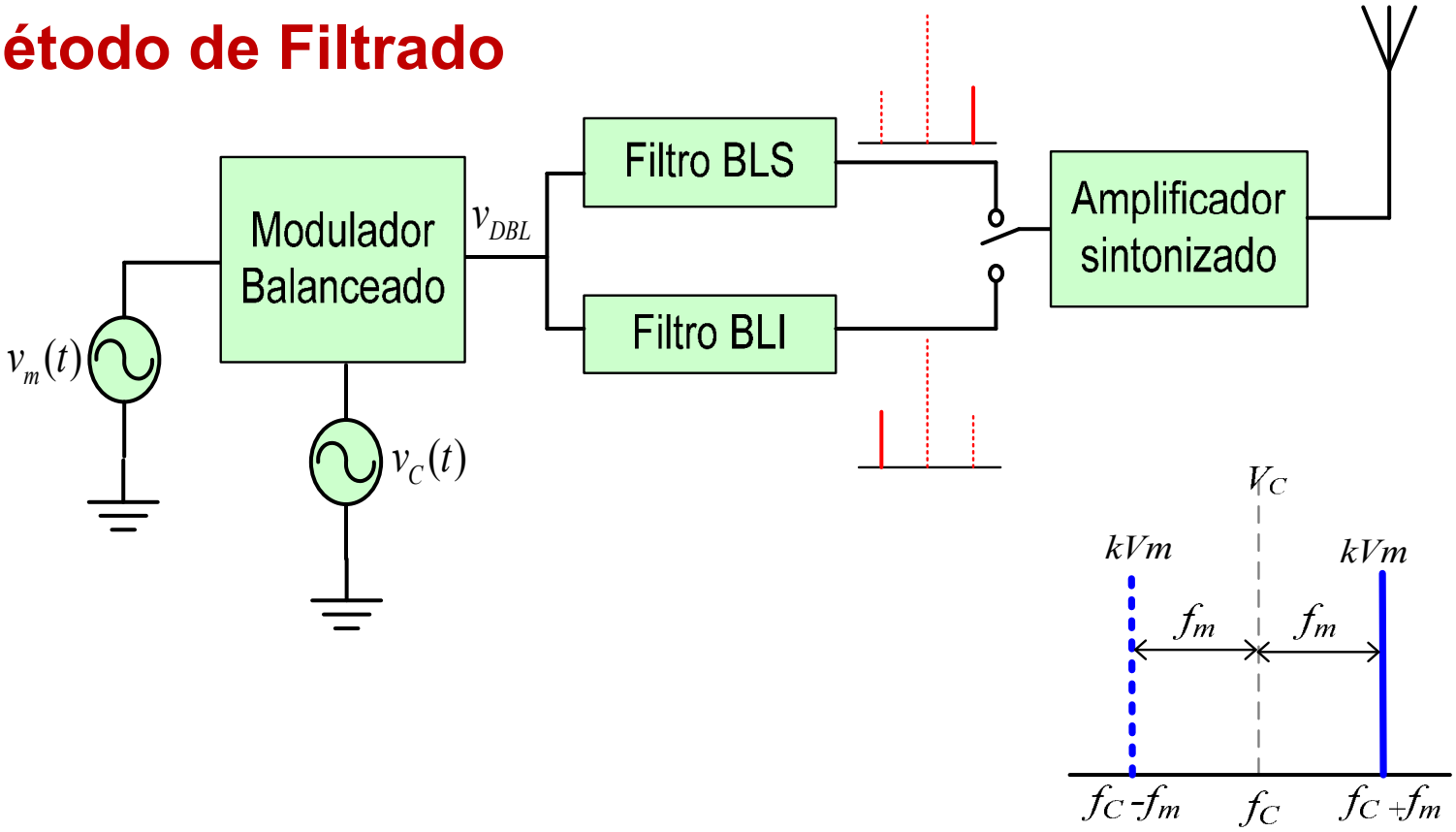






Generacion de Banda Lateral Unica- BLU

Método de Filtrado



Características de los filtros: banda de paso de 3000 Hz (para uso en banda vocal) y atenuación en el lado de la frecuencia central debe tener una pendiente de por lo menos 40dB en 600Hz. Mecánicos, cristal, cerámicos

Señales de AM- Banda Lateral Única- BLU

Ventajas:

1. La potencia de salida es utilizada totalmente por la señal que lleva la información.
2. Su ancho de banda es la mitad del de AM o DBL para igual $f_{mmáx}$.
3. Sólo se disipa potencia cuando se transmite información. Este hecho además de (a) hace que los equipos sean mucho más pequeños que los AM con igual alcance en su comunicación.
4. Reducción de ruido: Debido a que el sistema de BLU utiliza sólo la mitad del AB que la AM convencional, la potencia de ruido térmico se reduce a la mitad.

Desventajas

1. Mayor complejidad y costo de los equipos de transmisión y recepción.
2. Son muy sensibles a distorsión por diferencias entre la frecuencia de portadora del transmisor y la generada en el receptor.

Identidades trigonométricas

$\cos(A+B) = \cos A \cdot \cos B - \operatorname{sen} A \cdot \operatorname{sen} B$

$\cos(A-B) = \cos A \cdot \cos B + \operatorname{sen} A \cdot \operatorname{sen} B$

Entonces:

$\cos A \cdot \cos B = 0{,}5[\cos(A+B) + \cos(A-B)]$

$\operatorname{sen} A \cdot \operatorname{sen} B = 0{,}5[\cos(A-B) - \cos(A+B)]$

$\operatorname{sen}(A+B) = \operatorname{sen} A \cdot \cos B + \operatorname{sen} B \cdot \cos A$

$\operatorname{sen}(A-B) = \operatorname{sen} A \cdot \cos B - \operatorname{sen} B \cdot \cos A$

Luego:

$\operatorname{sen} A \cdot \cos B = 0{,}5[\operatorname{sen}(A+B) + \operatorname{sen}(A-B)]$

$\operatorname{sen} B \cdot \cos A = 0{,}5[\operatorname{sen}(A+B) - \operatorname{sen}(A-B)]$

$\cos(2A) = \cos^2 A - \operatorname{sen}^2 A$ y $1 = \cos^2 A + \operatorname{sen}^2 A$

Entonces:

$\cos^2 A = 0{,}5[1 + \cos(2A)]$

$\operatorname{sen}^2 A = 0{,}5[1 - \cos(2A)]$